

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 535.854

10.23947/1992-5980-2017-17-1-55-66

## Перспективное устройство для измерения линейной и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля\*

**И. П. Мирошниченко<sup>1\*\*</sup>**<sup>1</sup> Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

## Advanced device for measuring linear and angular components of small displacements of monitor object surfaces\*\*\*

**I. P. Miroshnichenko<sup>1\*\*</sup>**<sup>1</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Введение.** Статья посвящена измерениям линейных и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля. Для выполнения таких измерений разработано высокоточное бесконтактное устройство, основанное на современных лазерных технологиях и методах оптической интерферометрии, а именно двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями. Представлено расчетно-экспериментальное обоснование данного устройства. Таким образом, качество и состояние материалов и изделий могут контролироваться с помощью акустических неразрушающих методов.

**Материалы и методы.** Предложены новые программное обеспечение и математические модели, которые описывают оптические поля интерференционных картин, создаваемые рассматриваемым интерферометром. При численном моделировании распределений интенсивности в интерференционных картинах использованы различные виды светоделителей и различные случаи поляризации.

**Результаты исследования.** Разработаны новые математические модели и программное обеспечение для численного моделирования полей интенсивности оптического излучения в интерференционных картинах, учитывающие как линейную, так и угловые составляющие малого перемещения поверхности объекта контроля. Разработан и научно обоснован новый интерференционный метод измерений малых линейных и угловых перемещений, позволяющий объединить в одном измерительном средстве возможности измерителя как малых линейных, так и угловых перемещений поверхностей объектов контроля. Предложены новые оптические интерференционные способы и средства для бесконтактных измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, реализующие возможности метода и расширяющие функциональность известных измерителей малых перемещений.

**Обсуждение и заключения.** Полученные результаты могут быть использованы для высокоточных измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля. Сферы применения: экспериментальные исследования, оценка и диагностика состояния образцов конструк-

**Introduction.** Measuring the linear and angular components of small displacements of the monitor object surfaces is considered. A high-precision non-contact device based on the advanced laser technologies and methods of optical interferometry, namely a double-pass laser interferometer with integrated branches, is developed to perform these measurements. The calculated and experimental validation of the device is offered. Thus, the quality and condition of the materials and products can be controlled by means of the acoustic non-destructive methods.

**Materials and Methods.** New software and mathematical models describing optical fields of the interference patterns generated by the interferometer under consideration are offered. Various types of beam splitters and cases of polarization are used under the numerical simulation of the intensity distributions in the interference patterns.

**Research Results.** New mathematical models and software for the numerical simulation of the optical radiation intensity fields in the interference patterns considering both linear and angular components of small displacement of the surface of the test object are developed. A new interference technique of measuring small linear and angular displacements is developed and theoretically grounded. It allows combining the meter measuring capabilities for both small linear and angular displacements of the monitor object surfaces in a single tool. New optical interference methods and means for the noncontact measurements of small linear and angular movements of the monitor object surfaces that implement the method capabilities and extend the functionality of the known indicators of small displacements are offered.

**Discussion and Conclusions.** The obtained results can be used for the high-precision measurements of small linear and angular displacements of surfaces of the objects under control. Areas of application are the following: experimental research; assessment and diagnostics of the structural materials samples; investiga-

\*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-08-00740.

\*\*E-mail: ipmir@rambler.ru

\*\*\* The research is done within the frame of RFFI grant no. 16-08-00740.

ционных материалов; исследования быстропротекающих волновых процессов в слоистых конструкциях сложной формы, выполненных из анизотропных композиционных материалов. Методы, разработанные в рамках данного исследования, применимы в таких отраслях, как машиностроение, судостроение, авиастроение, приборостроение, энергетика и т. д.

**Ключевые слова:** лазерный интерферометр, измерения малых перемещений, линейные перемещения, угловые перемещения, объект контроля, диагностика состояния.

tions of fast wave processes in the layered structures of complex shape made of the anisotropic composite materials. The methods developed in this study are applicable in such industries as mechanical engineering, shipbuilding, aircraft engineering, instrument making, power engineering, and etc.

**Keywords:** laser interferometer, measuring small displacements, linear displacements, angular displacements, object under control, condition diagnosis.

**Введение.** В настоящее время актуальной научной и прикладной задачей является существенное повышение точности, качества и информативности результатов измерений малых перемещений поверхностей объектов контроля. С этой целью разрабатываются и внедряются высокоточные бесконтактные средства измерений, основанные на современных лазерных технологиях и методах оптической интерферометрии. В этом случае при контроле качества и диагностике состояния материалов и силовых элементов изделий необходимая информация регистрируется акустическими неразрушающими методами [1–7].

Научно-исследовательская и производственная деятельность требуют адекватной диагностики состояния конструкционных материалов и изделий на различных этапах их жизненного цикла и экспериментальных исследований, а также отслеживания процессов дефектообразования в новых конструкционных материалах. При этом одним из наиболее перспективных приборов является двухходовой лазерный интерферометр с совмещенными ветвями, адаптированный для решения измерительных задач [8–11]. В частности, целесообразной и эффективной представляется модификация, предполагающая расширение функциональных возможностей интерферометра за счет обеспечения одновременного измерения линейных и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля.

**Цель исследования.** Целью данного исследования являются разработка и расчетно-экспериментальное обоснование оптического интерференционного устройства для бесконтактного измерения линейных и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля при диагностике состояния материалов и изделий акустическими методами неразрушающего контроля на основе двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями.

**Численное моделирование и анализ его результатов.** Разработаны новые математические модели, описывающие оптические поля интерференционных картин, создаваемые рассматриваемым интерферометром. Предложено новое оригинальное программное обеспечение, реализующее данные математические модели, защищенное свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ [12–14].

Проведено численное моделирование распределений интенсивности в интерференционных картинах, создаваемых рассматриваемым лазерным интерферометром, с применением данных математических моделей и программного обеспечения. При этом использованы различные виды светоделителей и различные случаи поляризации.

Некоторые из полученных результатов представлены в виде рисунков. Так, график на рис. 1 отражает распределение интенсивности  $I(\Theta)$  в горизонтальном сечении интерференционной картины вдоль координаты  $\Theta$  в области наблюдения интерференционной картины.

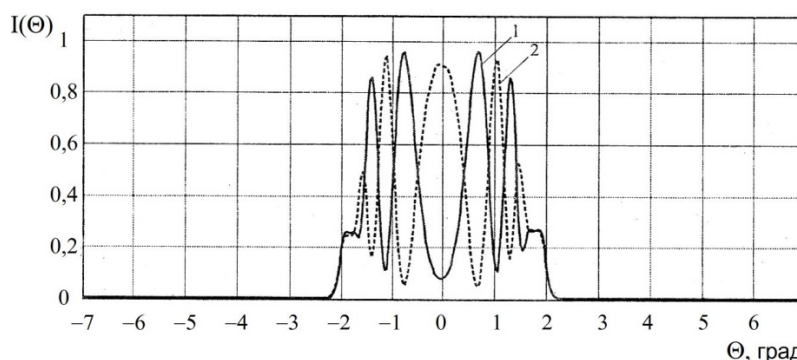


Рис. 1. Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (светоделитель — амплитудная синусоидальная решетка, параллельная поляризация)

Fig. 1. Intensity distribution in horizontal section of interference pattern (beam splitter - amplitude sinusoidal grating, parallel polarization)

На графике показан случай параллельной поляризации, когда в рассматриваемом интерферометре в качестве светоделителя использовалась амплитудная синусоидальная решетка.

В случае, представленном на рис. 2, светоделитель — амплитудная синусоидальная решетка при перпендикулярной поляризации.

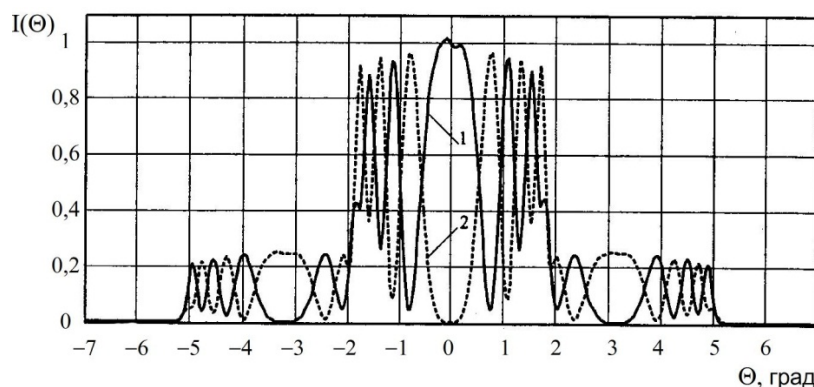


Рис. 2. Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (светоделитель — амплитудная синусоидальная решетка, перпендикулярная поляризация)

Fig. 2. Intensity distribution in horizontal section of interference pattern (beam splitter - amplitude sinusoidal grating, perpendicular polarization)

На рис. 3 светоделитель — это фазовая синусоидальная решетка для случая перпендикулярной поляризации.

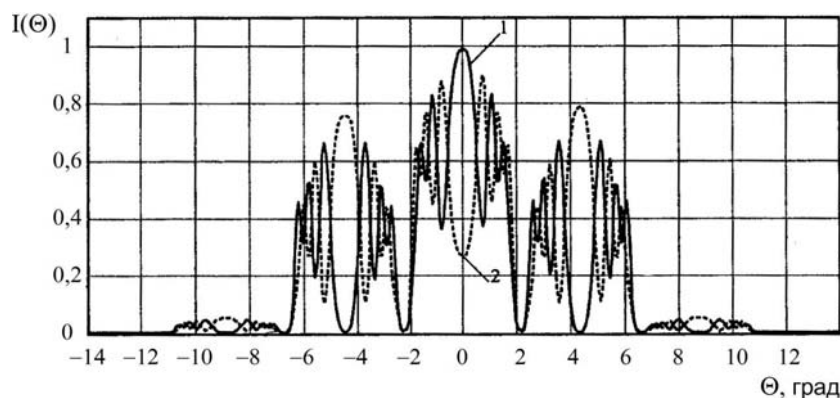


Рис. 3. Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (светоделитель — фазовая синусоидальная решетка, перпендикулярная поляризация)

Fig. 3. Intensity distribution in horizontal section of interference pattern (beam splitter - phase sinusoidal grating, perpendicular polarization)

Наконец, на рис. 4 светоделитель — фазовая зонная пластинка для случая перпендикулярной поляризации.

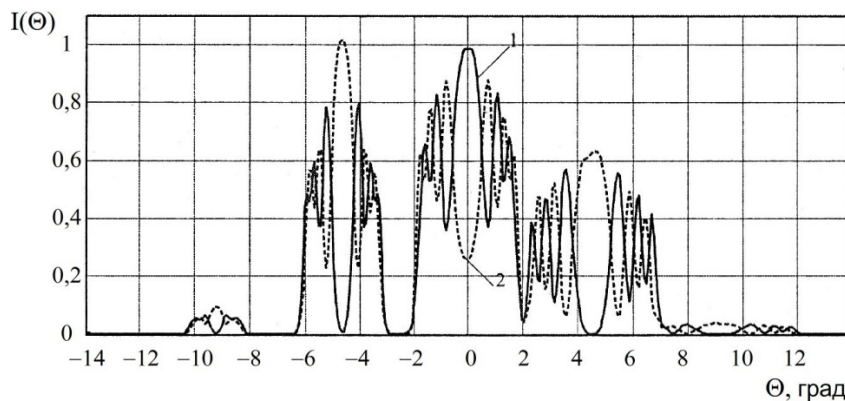


Рис. 4. Распределение интенсивности в горизонтальном сечении интерференционной картины (светоделитель — фазовая зонная пластинка, перпендикулярная поляризация)

Fig. 4. Intensity distribution in horizontal section of interference pattern (beam splitter - phase zone plate, perpendicular polarization)

На рис. 1–4 использованы следующие обозначения: 1 — зависимость получена при линейном перемещении  $\Delta h = 0$  и угловом перемещении  $\Delta \alpha = 0^\circ$ ; 2 — зависимость получена при  $\Delta h = \lambda/4$  и  $\Delta \alpha = 0^\circ$  (где  $\lambda$  — длина волны оптического излучения источника).

Анализ результатов численного моделирования, полученных для различных типов светоделителей, позволяет утверждать следующее. Если сравнивать параллельную и перпендикулярную поляризацию, то в последнем случае, когда вектор напряженности электрического поля находится в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, возможно более полно исследовать влияние дифракционных свойств светоделителей на параметры формируемой интерференционной картины.

Анализ результатов также показал, что при использовании в качестве светоделителей амплитудных решеток образуются дифракционные максимумы  $-1$  и  $+1$  порядков (см. рис. 2), а при использовании фазовых решеток кроме них присутствуют еще максимумы высших порядков (см. рис. 3–4).

Применение фазовых решеток при решении измерительных задач достаточно перспективно, так как позволяет получить в максимумах  $-1$ ,  $0$  и  $+1$  порядков примерно одинаковые амплитуды изменения интенсивности. При этом амплитуда интенсивности в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков выше, чем в соответствующих максимумах, образующихся при использовании амплитудной решетки.

Результаты моделирования показали, что разработанные математические модели и программное обеспечение позволяют исследовать влияние вида светоделителя и других параметров рассматриваемого интерферометра на формируемые интерференционные картины, что обеспечивает численное определение параметров средства измерений, оптимальных для заданной измерительной схемы и конкретной измерительной задачи.

**Метод измерения линейных и угловых составляющих малых перемещений и его расчетно-теоретическое обоснование.** Результаты описанного выше численного моделирования позволили разработать метод измерений линейных и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля. Новый подход заключается в анализе распределений интенсивности в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков интерференционной картины.

Из результатов моделирования следует, что в случае выполнения условия компарирования интенсивность  $I^{-1}$  и  $I^{+1}$  соответственно в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков интерференционной картины изменяется одинаково. В противном случае характер изменения интенсивности в максимумах указанных порядков различен.

Измерение интенсивностей  $I^{-1}$  и  $I^{+1}$  в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков интерференционной картины позволяет вместо уравнения с двумя неизвестными получить систему уравнений относительно  $\Delta h$  и  $\Delta \alpha$  (соответственно линейной и угловой составляющих малого перемещения поверхности объекта контроля):

$$\begin{cases} I^{-1} = f_1(\Delta h, \Delta \alpha) \\ I^{+1} = f_2(\Delta h, \Delta \alpha) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $f_1(\Delta h, \Delta \alpha)$ ,  $f_2(\Delta h, \Delta \alpha)$  — известные зависимости соответственно для максимумов  $-1$  и  $+1$  порядка, связывающие интенсивности соответственно с линейной  $\Delta h$  и угловой  $\Delta \alpha$  составляющими малого перемещения поверхности объекта контроля.

Значения  $\Delta h$  и  $\Delta \alpha$ , удовлетворяющие системе (1), и будут соответствовать действительному перемещению объекта.

При проведении численного моделирования были получены зависимости интенсивности от  $h$  в диапазоне от  $h = 0,0052$  м до  $h + 0,5\lambda$  м для значений  $\alpha = 0,07^\circ + \Delta \alpha$  в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков.

Отмеченные зависимости для значений  $\Delta \alpha = 0^\circ$ ,  $\Delta \alpha = 0,003^\circ$ ,  $\Delta \alpha = 0,006^\circ$  показаны на рис. 5, а (в максимуме  $-1$  порядка) и 5, б (в максимуме  $+1$  порядка).

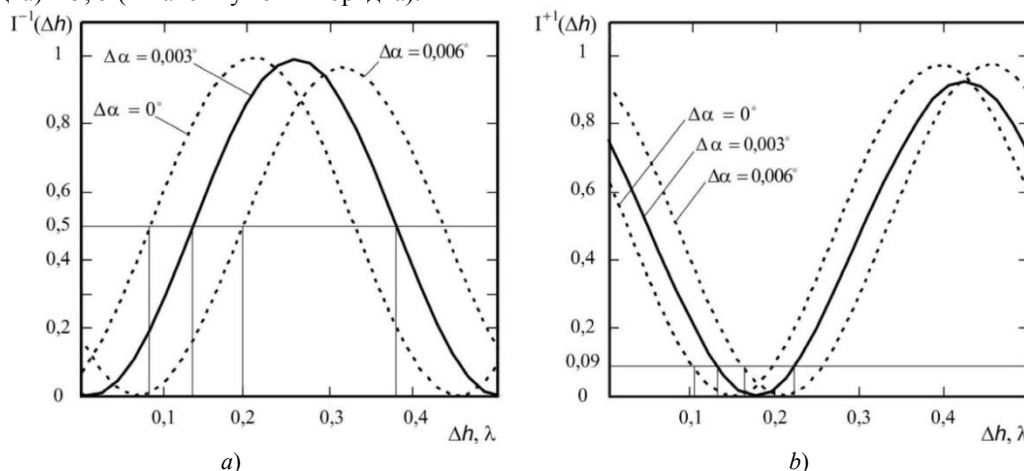


Рис. 5. Результаты численного моделирования  
Fig.5. Numerical simulation results

Для пояснения сущности разработанного метода допустим, что в результате измерения получены значения интенсивности  $I^{-1} = 0,5$  и  $I^{+1} = 0,09$ .

Из данных рис. 5, а следует, что  $I^{-1} = 0,5$  соответствует множество пар  $\Delta\alpha$  и  $\Delta h$ , например:  $\Delta\alpha = 0^\circ$ ,  $\Delta h = 0,08\lambda$ ;  $\Delta\alpha = 0,003^\circ$ ,  $\Delta h = 0,14\lambda$ ;  $\Delta\alpha = 0,006^\circ$ ,  $\Delta h = 0,2\lambda$  и т. д. Аналогично и в отношении  $I^{+1} = 0,09$ .

Однако эти множества имеют только одну общую точку, которая и является решением системы уравнений (1), а именно точка  $\Delta\alpha = 0,003^\circ$ ,  $\Delta h = 0,14\lambda$  (рис. 6).

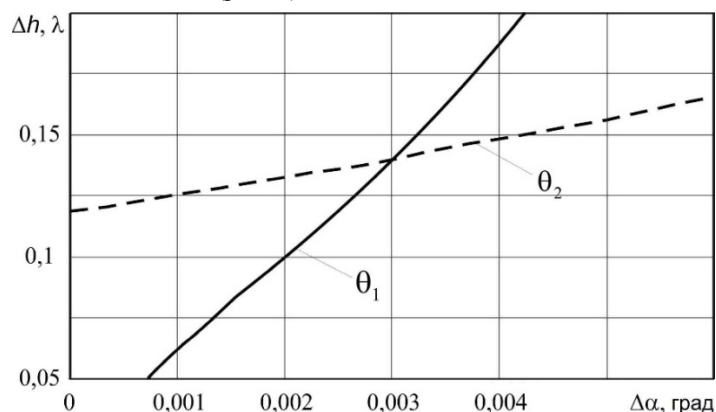


Рис. 6. Пример решения задачи

Fig.6. Problem solving example

Для построения зависимостей на этом рисунке регистрировались значения интенсивностей  $I^{-1} = 0,5$ ,  $I^{+1} = 0,09$  в направлениях  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  соответственно для максимумов  $-1$  и  $+1$  порядков, в которых были измерены интенсивности  $I^{-1}$  и  $I^{+1}$ .

Эти же зависимости можно получить графическим способом из результатов, часть которых представлена на рис. 6.

По результатам численного исследования данного метода измерений была разработана методика его реализации при решении практических задач.

**Экспериментальное исследование и анализ его результатов.** При проведении исследования использована экспериментальная установка (рис. 7), позволяющая обеспечить раздельное и одновременное воспроизведение заданных линейной и угловой составляющих малых перемещений.

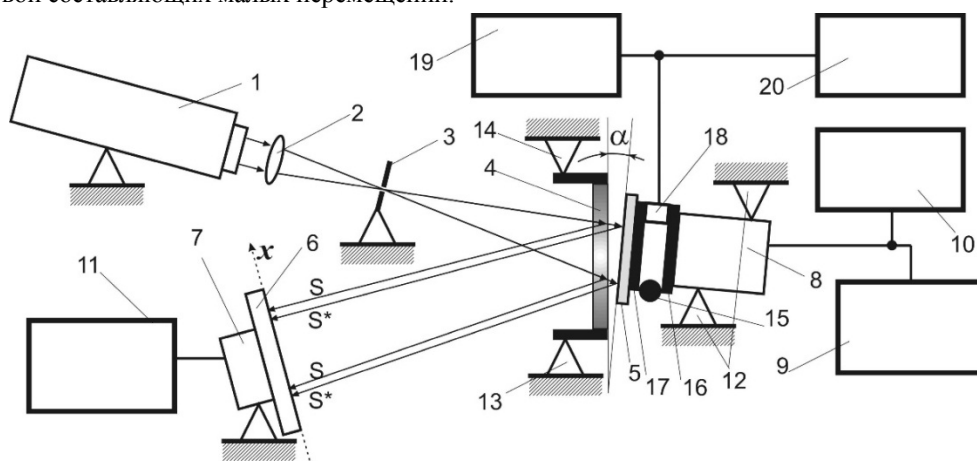


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Fig.7. Experimental plant diagram

Данная установка состоит из следующих элементов: 1 — оптически связанные и последовательно размещенные источники когерентного оптического излучения (*He-Ne* лазер, длина волны  $\lambda \approx 0,63$  мкм); 2 — фокусирующая линза; 3 — диафрагма пространственного фильтра; 4 — светоделитель, жестко закрепленный в устройстве 13; 5 — отражатель; 6 — экран; 7 — цифровое фотоприемное устройство; 11 — устройство регистрации и обработки (ПЭВМ).



Для создания моделируемых линейной и угловой составляющих малых перемещений отражатель 5 установлен на пьезоэлементе 8 с помощью пластинок 16 и 17, которые с одного края соединены шарниром 15, а с другого — жестко связаны с пьезоэлементом 18. Регуляторы механизма 12 крепления пьезоэлемента 8 служат для юстировки элементов установки. Пьезоэлементы 8 и 18 электрически соединены с источниками напряжения 9 и 19 и цифровыми вольтметрами 10 и 20 соответственно.

Принцип действия установки заключался в следующем.

Излучение лазера 1 после прохождения фокусирующей линзы 2 и диафрагмы пространственного фильтра 3 преобразовывалось в расходящийся пучок. Светоделитель 4 осуществлял деление расходящегося пучка по амплитуде. Одна часть отражалась от его поверхности (направление  $S-S$ ), а другая — от поверхности отражателя 5 (направление  $S^*-S^*$ ). При этом в результате дифракции на синусоидальной решетке (светоделителе) кроме максимума 0 порядка формировались максимумы  $-1$  и  $+1$  порядков.

Регуляторами устройства крепления 12 добивались пространственного совмещения объектного пучка (направление  $S^*-S^*$ ) с опорным (направление  $S-S$ ) в плоскости экрана 6, на котором формировалась интерференционная картина в виде максимумов  $-1$ ,  $0$  и  $+1$  порядков. Интенсивность регистрировалась фотоприемным устройством 7, а результаты измерений передавались для обработки в ПЭВМ 11.

На рис. 8 представлено изображение типовой интерференционной картины, где обозначения « $-1$ », « $0$ », « $+1$ » соответствуют максимумам интерференционной картины  $-1$ ,  $0$  и  $+1$  порядков, взаимное положение которых зависит от периода дифракционной решетки и от расстояния между светоделителем 4 и экраном 6.

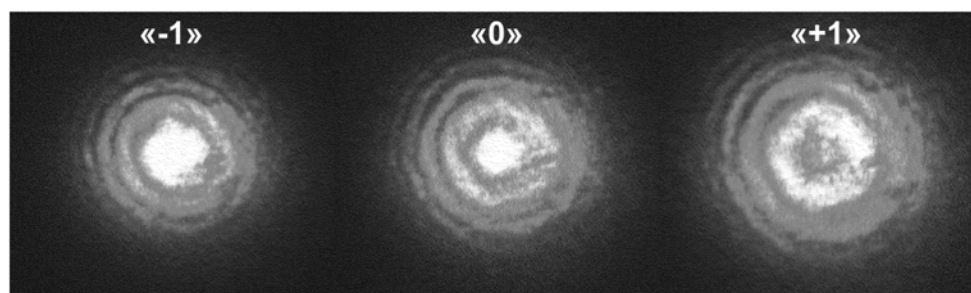


Рис. 8. Изображение типовой интерференционной картины

Fig. 8. Picture of basic interference pattern

Для моделирования линейной составляющей малых перемещений изменяли напряжение стабилизированного источника 9 на пьезоэлементе 8, который смещал отражатель 5.

Для моделирования угловой составляющей малых перемещений изменяли напряжение стабилизированного источника 19 на пьезоэлементе 18, в результате отражатель 5 поворачивался относительно шарнира 15.

Для одновременного моделирования линейной и угловой составляющих малых перемещений одновременно изменяли напряжение на пьезоэлементах 8 и 18.

Контроль величины напряжения на пьезоэлементах 8 и 18 осуществлялся цифровыми универсальными вольтметрами 10 и 20 соответственно.

Методика проведения эксперимента заключалась в пошаговом задании линейной составляющей  $\Delta h$  малого перемещения отражателя 5 при фиксированном значении угловой составляющей  $\Delta \alpha$ .

Регистрация сигнала фотоприемника 7 осуществлялась на каждом шаге. При этом цифровые изображения интерференционной картины в максимумах  $-1$ ,  $0$  и  $+1$  порядков передавались в устройство 11 в виде отдельных файлов стандартных графических форматов для обработки.

Разработанная методика проведения эксперимента обеспечила также экспериментальное моделирование рассмотренного выше примера численного решения системы уравнений (1).

При проведении численного моделирования основные параметры математической модели измерителя были приведены в соответствие с параметрами экспериментальной установки, что позволило сопоставить результаты численного моделирования и экспериментального исследования и подтвердить техническую реализуемость разработанного метода измерения малых перемещений.

Измерялись (рис. 9) зависимости интенсивности  $I^{-1}$  и  $I^{+1}$  от линейной составляющей  $\Delta h$  малого перемещения отражателя (представлена напряжением  $U1$  на пьезопреобразователе 8) и для различных значений его угловой составляющей  $\Delta \alpha$  малого перемещения отражателя (представлена напряжением  $U2$  на пьезопреобразователе 18). Указанные величины регистрировались в направлениях  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков (рис. 9, а и 9, b соответ-

ственно).

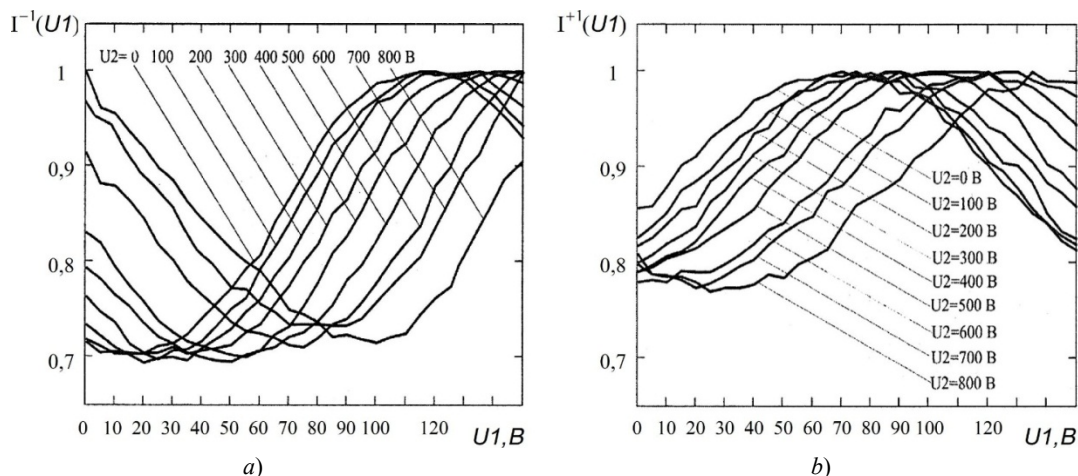


Рис. 9. Результаты экспериментального моделирования

Fig. 9. Experimental simulation results

На рис. 10 представлены зависимости интенсивностей  $I^-$  и  $I^+$ , полученные при сравнении результатов численного моделирования и экспериментального исследования соответственно в максимумах  $-1$  (рис. 10, а) и  $+1$  (рис. 10, б) порядков (сплошной линией показаны результаты численного моделирования, пунктиром — результаты экспериментального исследования).

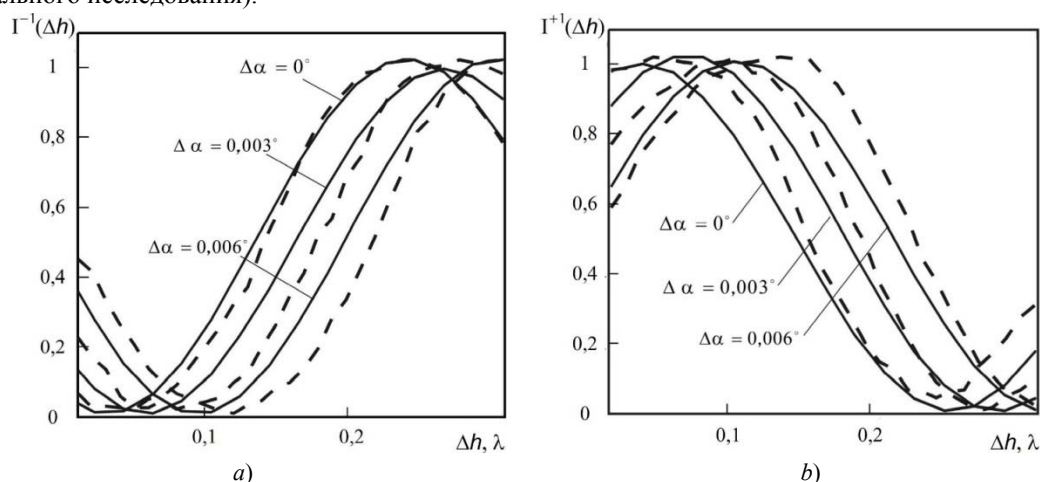


Рис. 10. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментального исследования

Fig. 10. Comparison of numerical simulation and experimental research results

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 10, наглядно подтверждает техническую реализуемость разработанного метода измерения малых перемещений.

**Способ измерения линейной и угловой составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля.** Результаты численного моделирования и экспериментального исследования позволили разработать новый способ бесконтактного измерения линейной и угловой составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля. В данном случае в качестве светоделиателя используют синусоидальную дифракционную решетку. На экран проецируют максимумы  $-1$  и  $+1$  порядков интерференционной картины. Фотоприемники разделяют на две группы и размещают в областях максимумов  $-1$  и  $+1$  порядков интерференционной картины. Значения составляющих малого перемещения определяют на основании двух значений интенсивности, измеренных группами фотоприемников по известным для каждого максимума зависимостям, связывающим ее с линейным и угловым перемещением. При этом в качестве результата принимают значение линейной и угловой составляющих перемещения, одновременно удовлетворяющее значениям измеренной интенсивности в максимумах  $-1$  и  $+1$  порядков.

Существенным отличием разработанного способа от известных аналогов является обеспечение одновременной бесконтактной регистрации линейной и угловой составляющих малых перемещений поверхности объекта контроля при помощи одного оптического измерителя перемещений, что позволяет существенно расширить его функциональные возможности и повысить качество результатов измерений.

Описанное техническое решение защищено патентом на изобретение [15].

**Способ и устройство для измерения линейной и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля.** Описанный выше способ не позволяет одновременно измерять линейную и все угловые составляющие малого перемещения поверхности объекта контроля. Он может быть применим к измерению линейной и только одной угловой составляющих малого перемещения при условии, что влиянием другой угловой составляющей можно пренебречь. Данное обстоятельство в значительной степени ограничивает функциональные возможности этого метода и область его применения.

На практике при проведении испытаний реальных объектов контроля перемещения их поверхностей, как правило, имеют линейную и угловые составляющие. Невозможность одновременной регистрации линейной и угловых составляющих значительно снижает информативность результатов измерений, требует установки дополнительных устройств для регистрации угловой составляющей перемещений, усложняя конструкцию измерительного устройства.

Линейную и все угловые составляющие малого перемещения поверхности объекта контроля можно определить на основании значений интенсивности, измеренных группами фотоприемных устройств в максимумах  $-1$ ,  $0$  и  $+1$  порядков, по известным для каждого максимума зависимостям интенсивности от линейной и угловых составляющих малых перемещений поверхности объекта контроля. При этом за результат измерения принимают то значение линейной и угловых составляющих перемещения, которое одновременно удовлетворяет измеренным значениям интенсивности в максимумах  $-1$ ,  $0$  и  $+1$  порядков интерференционной картины.

Схема одного из возможных вариантов устройства, реализующего предлагаемый способ, представлена на рис. 11.

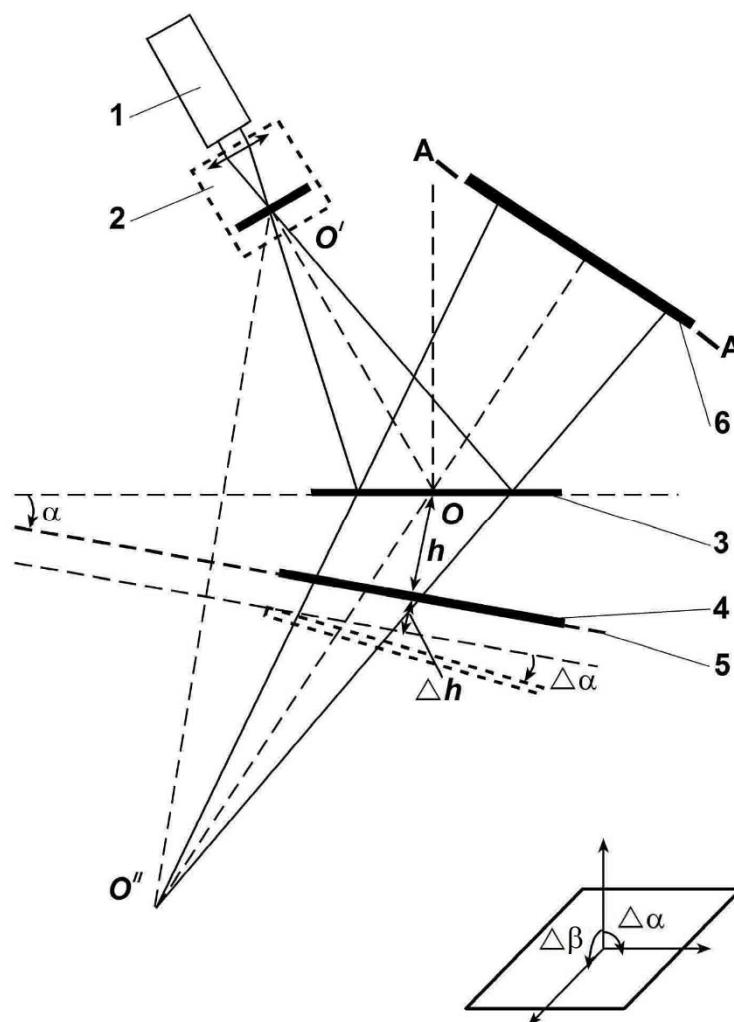


Рис. 11. Схема устройства для измерения линейной и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля

Fig. 11. Diagram of device for measuring linear and angular components of small displacements of monitor object surfaces

Данное устройство состоит из следующих элементов: 1 — источник когерентного оптического излучения (лазер); 2 — оптическая система, преобразующая излучение источника 1 в расходящийся пучок; 3 — светоделитель, выполненный в виде фазовой решетки; 4 — отражатель, жестко закрепленный на поверхности 5 объекта контроля; 6 — экран, в плоскости которого установлены с возможностью регулировки положения фотоприемные устройства 7



(например, фотодиоды и т. п., рис. 12), разделенные на три группы (8, 9, 10), каждая из которых размещена в соответствующих областях максимумов: –1 порядка (11), 0 порядка (12) и +1 порядка (13) интерференционной картины 14.

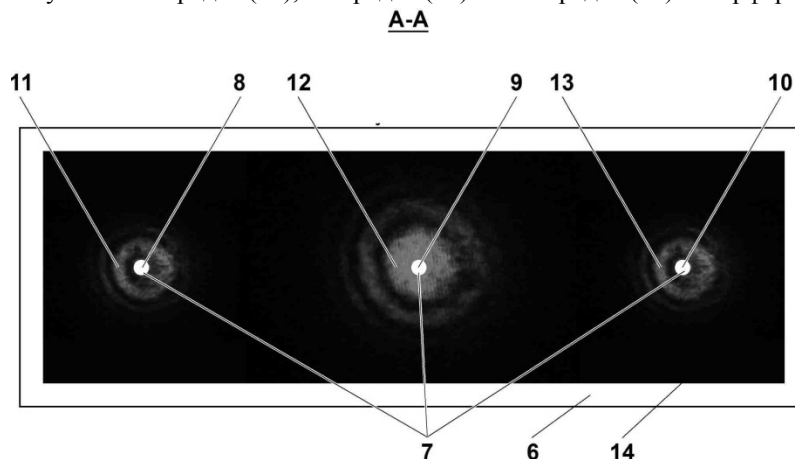


Рис. 12. Внешний вид интерференционной картины в области экрана

Fig. 12. Outer appearance of interference pattern on-screen

Фотоприемные устройства 7 электрически соединены с системой регистрации, обработки и отображения результатов измерений.

Отражатель 4 удален от внутренней поверхности светоделиителя 3 на расстояние  $h$ . Отражатель 4 и светоделиитель 3 расположены друг к другу под углом  $\alpha$ .

Возможным может быть также вариант, при котором отражатель 4 отсутствует, а его функции выполняет сама отражающая поверхность 5 объекта контроля.

Максимумы –1 порядка 11, 0 порядка 12 и +1 порядка 13 интерференционной картины 14 проецируются на экран 6.

Данное устройство работает следующим образом.

В процессе проведения испытаний при возникновении линейной  $\Delta h$  и (или) угловых  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  составляющих перемещения поверхности 5 объекта контроля происходит изменение интенсивности оптического поля в максимумах –1 порядка 11, 0 порядка 12 и +1 порядка 13 интерференционной картины 14, в том числе и в соответствующих их областях по месту установки выделенных групп 8, 9 и 10 фотоприемных устройств 7.

Фотоприемные устройства 7 регистрируют интенсивность оптического поля. При этом результатами измерений являются значения интенсивностей, полученные от каждой из групп 8, 9 и 10 фотоприемных устройств 7.

Система регистрации, обработки и отображения результатов измерений обеспечивает регистрацию значений интенсивности от каждой из групп 8, 9 и 10 фотоприемных устройств 7 и производит их обработку.

Возможным вариантом обработки является, например, решение системы уравнений вида:

$$\begin{cases} I^{-1} = f_1(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\beta) \\ I^0 = f_2(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\beta) \\ I^{+1} = f_3(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\beta) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $f_1(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\beta)$ ,  $f_2(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\beta)$ ,  $f_3(\Delta h, \Delta\alpha, \Delta\beta)$  — известные зависимости соответственно для максимумов –1 порядка 11, 0 порядка 12 и +1 порядка 13, связывающие интенсивности соответственно с линейной  $\Delta h$  и угловыми  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  составляющими перемещения поверхности 5 объекта контроля;  $I^{-1}$ ,  $I^0$  и  $I^{+1}$  — значения интенсивности, измеренные каждой из групп 8, 9 и 10 фотоприемных устройств 7, установленных в соответствующих областях максимумов –1 порядка 11, 0 порядка 12 и +1 порядка 13 интерференционной картины 14.

Результатом обработки являются значения линейной  $\Delta h$  и значения угловых  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  составляющих перемещения поверхности 5 объекта контроля, одновременно удовлетворяющие значениям интенсивности  $I^{-1}$ ,  $I^0$  и  $I^{+1}$ .

Описанное техническое решение также защищено патентом Российской Федерации на изобретение [16].

**Выводы.** Разработаны математические модели и программное обеспечение для численного моделирования полей интенсивности оптического излучения в интерференционных картинах, создаваемых оптическим измерителем малых перемещений на основе двухходового лазерного интерферометра с совмещенными ветвями. Представленные новые модели и ПО учитывают как линейную, так и угловые составляющие малого перемещения поверхности объекта контроля.

Разработан и научно обоснован новый интерференционный метод, сочетающий в одном средстве возможности измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля. Данный метод позволяет расширить область применения лазерных интерферометров для создания на их основе перспективных средств диагностики технического состояния материалов и изделий.

Предложены новые оптические интерференционные способы и средства для бесконтактных измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля, реализующие возможности метода и расширяющие функциональные возможности известных измерителей малых перемещений.

Полученные результаты могут быть использованы для высокоточных измерений малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля при проведении экспериментальных исследований, оценке и диагностике состояния образцов конструкционных материалов, фрагментов перспективных изделий и изделий в целом, исследовании быстропротекающих волновых процессов в слоистых конструкциях сложной формы, выполненных из анизотропных композиционных материалов, при исследовании процессов дефектообразования в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках и т. п. Разработанный метод применим в таких отраслях, как машиностроение, судостроение, авиастроение, приборостроение, энергетика и т.д.

### Библиографический список

1. Мирошниченко, И. П. Результаты экспериментальных исследований интерференционного измерителя малых перемещений / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Измерительная техника. — 2006. — № 5. — С. 22–25.
2. Экспериментальная установка для исследования процессов дефектообразования в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках / И. П. Мирошниченко [и др.] // Металлург. — 2006. — № 7. — С. 77–78.
3. Мирошниченко, И. П. Методы измерения смещений поверхности объектов контроля лазерными интерферометрами / И. П. Мирошниченко, В. Е. Алехин, В. П. Сизов // Дефектоскопия. — 2007. — № 2. — С. 53–61.
4. Мирошниченко, И. П. Особенности использования интерференционных измерителей малых перемещений при решении задач диагностики технического состояния конструкций / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Дефектоскопия. — 2007. — № 4. — С. 31–38.
5. Экспериментальное исследование особенностей метода подсвечивания поверхности объекта контроля для измерения смещений лазерными интерферометрами / В. Е. Алехин [и др.] // Дефектоскопия. — 2007. — № 9. — С. 37–43.
6. Мирошниченко, И. П. Экспериментальное обоснование интерференционного метода измерения перемещений на основе подсвечивания поверхности объекта контроля / И. П. Мирошниченко, В. Е. Алехин, А. Г. Серкин // Измерительная техника. — 2008. — № 10. — С. 26–30.
7. Мирошниченко, И. П. Усовершенствованная экспериментальная установка для исследования процессов дефектообразования в образцах конструкционных материалов / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Металлург. — 2010. — № 3. — С. 68–69.
8. Novel Test Means and Techniques Based on Optical Interferometry and Acoustic Emission to Study Displacements of Object Surfaces and Damage of High-Temperature Superconductive Tapes and Related Composites / I. P. Miroshnichenko [et al.] // Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. — New York : Nova Science Publishers, 2012. — P. 238–282.
9. Novel Optical Means for Measurement of Displacements of Surfaces of the Control Objects at Diagnostics of Materials and Goods / I.P. Miroshnichenko [et al.] // Physics and Mechanics of New Materials and their Applications. — New York : Nova Science Publishers, 2013. — P. 145–154.
10. Miroshnichenko, I. P. Novel Optic Devices for Measurement of Displacements Based on Method of Control Object Highlighting by Using Laser Interferometer / I. P. Miroshnichenko, I. A. Parinov, S.-H. Chang // Advanced Materials — Studies and Applications. — New York : Nova Science Publisher, 2015. — P. 437–452.
11. Mathematical Models, Program Software, Technical and Technological Solutions for Measurement of Displacements of the Control Object Surfaces by Laser Interferometer / I.P. Miroshnichenko [et al.] // Advanced Materials Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. — Cham ; Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer International Publishing, 2016. — Vol. 175. — P. 341–356.
12. Мирошниченко, И. П. Численное исследование метода измерений малых линейных и угловых перемещений лазерными интерферометрами / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Измерительная техника. — 2007. — № 1. — С. 9–13.
13. Мирошниченко, И. П. Унифицированный метод измерения малых линейных и угловых перемещений поверхностей объектов контроля / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин // Дефектоскопия. — 2008. — № 5. — С. 23–27.
14. Мирошниченко, И. П. Использование точечного источника излучения для расширения функциональных возможностей измерителя перемещений / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов // Оптический журнал. — 2008. — Т. 75, № 7. — С. 41–47.

15. Способ измерения линейных и угловых перемещений : патент 2388994 Рос. Федерация : G01B 11/00, G01B 9/02 / И. П. Мирошниченко, А. Г. Серкин, В. П. Сизов. — № 2008141364/28 ; заявл. 20.10.08 ; опубл. 10.05.10, Бюл. № 13. — 8 с.

16. Способ измерения линейной и угловых составляющих малых перемещений поверхностей объектов контроля : патент 2606245 Рос. Федерация : G01B 11/24 / И. П. Мирошниченко, И. А. Паринов, В. П. Сизов. — № 2015140197/28 ; заявл. 21.09.15 ; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. — 11 с.

#### References

1. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy interferentsionnogo izmeritelya malykh peremeshcheniy. [Results of experimental studies on interferometers for small displacements.] Measurement Technique, 2006, no. 5, pp. 22–25 (in Russian).

2. Miroshnichenko, I.P., et al. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya protsessov defektoobrazovaniya v lentochnykh vysokotemperaturnykh sverkh-provodnikakh. [Experimental plant for research of defect formation in band high temperature superconductors.] Metallurgist, 2006, no. 7, 77–78 (in Russian).

3. Miroshnichenko, I.P., Alekhin, V.E., Sizov, V.P. Metody izmereniya smeshcheniy poverkhnosti ob'ektov kontrolya lazernymi interferometrami. [Use of Laser Interferometers for Measuring Displacements of the Surfaces of Tested Objects.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, no. 2, pp. 53–61 (in Russian).

4. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Osobennosti ispol'zovaniya interferentsionnykh izmeriteley malykh peremeshcheniy pri reshenii zadach diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya konstruksiy. [Using Interferometers for the Measurement of Small Displacements during Solution of the Problems of the State of Structures.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, no. 4, pp. 31–38 (in Russian).

5. Alekhin, V.E., et al. Eksperimental'noe issledovanie osobennostey metoda podsvechivaniya poverkhnosti ob'ekta kontrolya dlya izmereniya smeshcheniy lazernymi interferometrami. [Experimental Study of the Features of the Method for Illuminating the Surface of a Tested Object for Measuring Displacements with Laser Interferometers.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, no. 9, pp. 37–43 (in Russian).

6. Miroshnichenko, I.P., Alekhin, V.E., Serkin, A.G. Eksperimental'noe obosnovanie interferentsionnogo metoda izmereniya peremeshcheniy na osnove podsvechivaniya poverkhnosti ob'ekta kontrolya. [Experimental study on interference method of measuring displacements on the basis of monitor object surface lightening.] Measurement Technique, 2008, no. 10, pp. 26–30 (in Russian).

7. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G. Uovershenstvovannaya eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya protsessov defektoobrazovaniya v obraztsakh konstruksionnykh materialov. [Improved experimental plant for investigation of defect formation processes in samples of constructional materials.] Metallurgist, 2010, no. 3, pp. 68–69 (in Russian).

8. Miroshnichenko, I.P., et al. Novel Test Means and Techniques Based on Optical Interferometry and Acoustic Emission to Study Displacements of Object Surfaces and Damage of High-Temperature Superconductive Tapes and Related Composites. Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2012, pp. 238–282.

9. Miroshnichenko, I.P., et al. Novel Optical Means for Measurement of Displacements of Surfaces of the Control Objects at Diagnostics of Materials and Goods. Physics and Mechanics of New Materials and their Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013, pp. 145–154.

10. Miroshnichenko, I. P., Parinov, I. A., Chang, S.-H. Novel Optic Devices for Measurement of Displacements Based on Method of Control Object Highlighting by Using Laser Interferometer. Advanced Materials — Studies and Applications. New York: Nova Science Publisher, 2015, pp. 437–452.

11. Miroshnichenko, I.P., et al. Mathematical Models, Program Software, Technical and Technological Solutions for Measurement of Displacements of the Control Object Surfaces by Laser Interferometer. Advanced Materials Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer International Publishing, 2016, vol. 175, pp. 341–356.

12. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G., Sizov, V.P. Chislennoe issledovanie metoda izmereniy malykh lineynykh i uglovykh peremeshcheniy lazernymi interferometrami. [Numerical study on method of measuring small linear and angular displacements by laser interferometers.] Measurement Technique, 2007, no. 1, pp. 9–13 (in Russian).

13. Miroshnichenko, I.P. Unifitsirovannyy metod izmereniya malykh lineynykh i uglovykh peremeshcheniy poverkhnostey ob'ektov kontrolya. [A Unified Method for Measuring Small Linear and Angular Displacements of the Surfaces of Tested Objects.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, no. 5, pp. 23–27 (in Russian).

14. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G., Sizov, V.P. Ispol'zovanie tochechnogo istochnika izlucheniya dlya rasshireniya funktsional'nykh vozmozhnostey izmeritelya peremeshcheniy. [Using the point-light source to extend the functionality of the displacement controller.] Journal of Optical Technology, 2008, vol. 75, no. 7, pp. 41–47.

15. Miroshnichenko, I.P., Serkin, A.G., Sizov, V.P. Sposob izmereniya lineynykh i uglovykh peremeshcheniy: patent 2388994 Ros. Federatsiya: G01B 11/00, G01B 9/02. [A method for measuring linear and angular displacements.] Patent RF, no. 2388994, 2010 (in Russian).

16. Miroshnichenko, I.P., Parinov, I.A., Sizov, V.P. Sposob izmereniya lineynoy i uglovykh sostavlyayushchikh malykh peremeshcheniy poverkhnostey ob"ektov kontrolya: patent 2606245 Ros. Federatsiya : G01B 11/24. [A method for measuring linear and angular components of small displacements of monitor object of surfaces.] Patent RF, no. 2606245, 2017 (in Russian).

Поступила в редакцию 01.09.2016

Сдана в редакцию 01.09.2016

Запланирована в номер 11.01.2017

Received 01.09.2016

Submitted 01.09.2016

Scheduled in the issue 11.01.2017

**Об авторе:**

**Мирошниченко Игорь Павлович**, заведующий кафедрой «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, Scopus Author ID: 16203765300, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9450-2500>, [ipmir@rambler.ru](mailto:ipmir@rambler.ru)

**Author:**

**Miroshnichenko, Igor P.**, head of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, RF), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, Scopus Author ID: 16203765300, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9450-2500>, [ipmir@rambler.ru](mailto:ipmir@rambler.ru)